

# Радиотехническая аппаратура и ее применение

УДК 621.326.67

## Реализация широкополосных систем пространственной режекции помех

И.П. Егоров, П.В. Русаков, Д.Д. Ганзий

Представлены материалы, посвященные физическим и техническим принципам реализации систем пространственной адаптации к помеховой обстановке.

Materials dedicated to physical and technical principals of realization of space adaptation to hidrance conditions are represented here.

Построение системы пространственной режекции помех (СПРП) для связных радиостанций необходимо проводить с учетом физических и технических принципов технологической реализации.

Основные требования к СПРП, представленные в [1 – 3], сводятся к следующему:

количество компенсационных каналов (антенн)  $N$  должно соответствовать количеству одновременно действующих помех  $n$ :

$$N = n; \quad (1)$$

диаграммы направленности основной и дополнительных компенсационных антенн должны быть ортогональны;

произведение коэффициента усиления компенсационной антенны в  $i$ -ом направлении  $G_{ki}$  на коэффициент передачи  $K_{ki}$  тракта от компенсационной антенны до МШУ компенсационного канала должно быть не менее произведения коэффициента усиления основной антенны в  $i$ -ом направлении  $G_{oi}$  на коэффициент передачи  $K_o$  тракта от основной антенны до МШУ основного канала:

$$G_{ki}K_{ki} \geq G_{oi}K_o. \quad (2)$$

Первое требование к СПРП, соотношение (1), должно быть уточнено, поскольку помехи равномерно действуют из разных точек окружающего пространства, и количество дополнительных адаптивных компенсационных антенн будет определяться не только предполагаемым количеством воздействующих помех, но и размерами помехоопасных телесных углов, поэтому

$$N \geq n. \quad (3)$$

Ортогональность (или развязка) диаграмм направленности основной и дополнительной антенн необходима для снижения величины полезного сигнала в компенсационных каналах, поскольку полезный сигнал, проникающий в цепь адаптации, ухудшает не только подавление помех, но и устойчивость всего устройства [4].

Согласно неравенству (2) сигнал помехи в компенсационном канале не должен быть меньше сигнала помехи в основном канале защищаемой станции. С учетом температуры шума МШУ основного и компенсационного каналов  $T_{шo}$ ,  $T_{шк}$  соответственно неравенство (2) можно записать в виде

$$\frac{G_{ki}K_{ki}}{T_{шк}} \geq \frac{G_{oi}K_o}{T_{шo}}, \quad (4)$$

или

$$(G/T)_{ki} \geq (G/T)_{oi},$$

где  $(G/T)_{ki}$ ,  $(G/T)_{oi}$  – добротности компенсационного и основного каналов в  $i$ -ом направлении соответственно.

Неравенство (4) позволяет уменьшить размеры компенсационных антенн за счет уменьшения температуры шума МШУ компенсационных каналов и, по-видимому, является наиболее полным физическим требованием реализации СПРП.

Кроме того, если имеет место неравенство, полученное на основе результатов работы [5],

$$\frac{L_o}{c} \sin \Theta \ll \frac{1}{\Delta f}, \quad (5)$$

где  $L_0$  – размер апертуры СПРП (максимальное расстояние между фазовыми центрами антенн основной и дополнительной);  $\Delta f$  – ширина спектра сигнала помехи;  $\Theta$  – угол между направлением прихода волны и нормалью к апертуре, сигнал помехи является узкополосным в пространственно-временном смысле. Для узкополосного сигнала пространственная и временная обработки разделены, и антенна выполняет функцию пространственной обработки, временная обработка проводится только в приемнике.

При невыполнении неравенства (5) сигнал является широкополосным в пространственно-временном смысле, факторизация такого сигнала невозможна, невозможна и факторизация комплексного весового коэффициента (КВК), функции антенны не могут быть сведены только к пространственной обработке, и в СПРП в этом случае следует осуществлять совместную пространственно-временную обработку сигнала.

Пространственно-временная обработка сигнала в СПРП связана с необходимостью изменения КВК в соответствии с огибающей полезного сигнала, для чего необходимо применение трансверсальных фильтров (ТВФ). Реализация широкополосной адаптивной диаграммо-образующей системы (АДОС) на основе ТВФ возможна и на СВЧ, но представляет определенные технологические сложности. Поэтому желательно создавать такое антенное устройство (АУ) в СПРП, при котором возможна факторизация сигнала и соответственно факторизация КВК. Функции антенны в этом случае сводятся только к пространственной обработке.

Для реализации указанного неравенства при воздействии узкополосной помехи *под постоянным телесным углом*, расстояние  $L_0$  между фазовыми центрами основной и дополнительной антеннами можно уменьшить путем подбора одинаковых набегов фаз сигналов по основному и компенсационным каналам с помощью отрезков недисперсионных линий передачи, например, отрезков фазостабильного кабеля.

При широкополосной помехе или меняющейся пространственные координаты узкополосной помехе необходимо применение ТВФ на основе, например, регулируемой многоотводной линии задержки (ЛЗ). В каждом отводе ЛЗ устанавливается

регулятор комплексных амплитуд (РКА) с квадратурным расщеплением сигналов, что в настоящее время технологически реализуемо, но требует дополнительных затрат времени на проверку и настройку подобных структур. Эффективность СПРП при использовании ТВФ с тремя и пятью отводами, как показано в [1], практически одинакова, и для относительной частотной полосы сигнала до 40% достаточно ТВФ с тремя отводами. На рис. 1 представлена функциональная схема

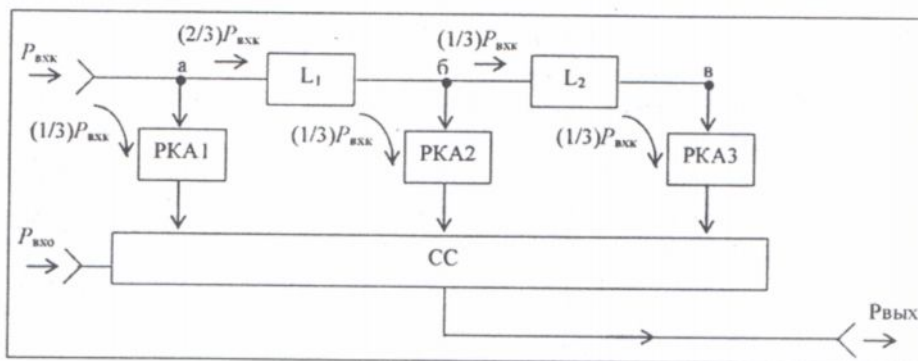


Рис. 1

АДОС на основе ТВФ с тремя отводами, где обозначено  $P_{вхк}$  – входная мощность помехи в компенсационном канале;  $P_{вхо}$  – суммарная мощность полезного сигнала и помехи в основном канале;  $L_1, L_2$  – ЛЗ (отрезки линий соответствующей длины);  $РКА1, \dots, РКА3$  – РКА на основе квадратурного расщепления сигналов;  $СС$  – синфазный сумматор мощности. Расстояние между отводами а – б, б – в определяется требуемой шириной полосы частот

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi\tau}, \text{ где } \tau - \text{ величина задержки сигнала в каждом элементе } L_i.$$

Линия задержки с отводами для ТВФ можно реализовать на основе делителей мощности с неравным делением для равномерного распределения входной мощности по соответствующим отводам ТВФ. Первый делитель мощности должен иметь коэффициент деления 2:1, второй 1:1. Длины отрезков линии между точками а, б и б, в одинаковы и равны следующей величине:

$$L_{аб} = L_{бв} \leq \frac{c}{2\pi\Delta f}, \text{ где } c$$

– скорость света. регуляторы комплексных амплитуд могут быть реализованы по схеме на рис. 2, где обозначено:  $A1, A2$  – регулируемые аттенюаторы с коэффициентами затухания соответственно  $\alpha_1, \alpha_2$ ;  $\Phi1, \Phi2$  – фазовые манипуляторы  $0 - \pi$ ; КД – квадратурный делитель. Изменение весового вектора осуществляется в соответствии с помеховой обстановкой и

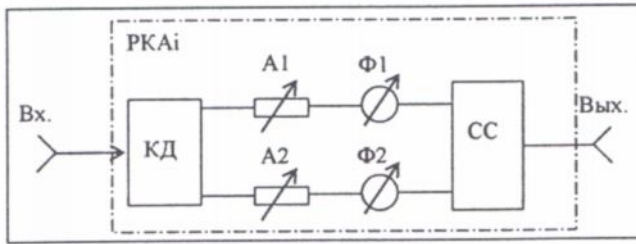


Рис. 2

алгоритмом адаптации за счет изменения фаз фазовых манипуляторов –  $\phi_{m1}, \phi_{m2}$  в парциальных каналах РКА на  $0 - \pi$  и регулировки затухания  $\alpha_1, \alpha_2$  в аттенюаторах А1, А2 путем подачи управляющих напряжений от адаптивного процессора (АП) на манипуляторы и аттенюаторы и последующего суммирования сигналов от дополнительного 1 и основного 2 излучателей в сумматоре СС.

Оценка эффективности функциональной схемы производится с помощью функции цели, представляющей собой отношение мощности, имеющей место на выходе АДОС к нормирующему выражению  $|\dot{U}_2|^2/(4R), R=50 \text{ Ом}$ .

Анализ функциональной схемы АДОС на основе ТВФ (см. рис. 1) показывает, что функция цели имеет вид

$$P_{\Sigma} = \left( \frac{\alpha_1 U_1}{8} \cos \phi_{m1} - \frac{\alpha_2 U_1}{8} \sin \phi_{m2} + xx1 \right)^2 + \left( \frac{\alpha_1 U_1}{8} \sin \phi_{m1} + \frac{\alpha_2 U_1}{8} \cos \phi_{m2} + xx2 \right)^2, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{где } xx1 &= A1 \cdot \cos(\phi_1 + \phi_{m11}) - A2 \cdot \sin(\phi_1 + \phi_{m21}) + \\ &+ A3 \cdot \cos(\phi_2 + \phi_{m111}) - A4 \cdot \sin(\phi_2 + \phi_{m211}) + \frac{U_2}{\sqrt{2}} \cos \psi, \\ xx2 &= A1 \cdot \sin(\phi_1 + \phi_{m11}) + A2 \cdot \cos(\phi_1 + \phi_{m21}) + \\ &+ A3 \cdot \sin(\phi_2 + \phi_{m111}) + A4 \cdot \cos(\phi_2 + \phi_{m211}) + \frac{U_2}{\sqrt{2}} \sin \psi, \end{aligned}$$

$$A1 = \frac{\alpha_{11} U_1}{8\sqrt{2}}, \quad A2 = \frac{\alpha_{21} U_1}{8\sqrt{2}}, \quad A3 = \frac{\alpha_{111} U_1}{8\sqrt{2}}, \quad A4 = \frac{\alpha_{211} U_1}{8\sqrt{2}},$$

$$\phi_1 = \frac{2\pi L_1}{\lambda_0}, \quad \phi_2 = \frac{2\pi L_2}{\lambda_0}, \quad L_1 = L_2 = \frac{c}{2\pi \Delta f}, \quad \psi = \frac{\pi}{6},$$

$\phi_{12} = \phi_1 + \phi_2$ ;  $U_1, U_2$  – амплитуды СВЧ-напряжений на соответствующих входах ТВФ;  $\alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{111}, \alpha_{211}$  – величины коэффициентов затухания в аттенюаторах РКА2, РКА3 соответственно;  $\phi_{m1}, \phi_{m2}, \phi_{m11}, \phi_{m21}, \phi_{m111}, \phi_{m211}$  – величины фаз в фазовых манипуляторах РКА2, РКА3 соответственно.

Результаты машинных исследований выражения (6) представлены на рис. 3, а, б для  $\lambda_0 = 8,2 \text{ см}; \Delta f = 500 \text{ МГц}; \alpha_{11} = \alpha_{21} = \alpha_{111} = \alpha_{211} = 0$ ;

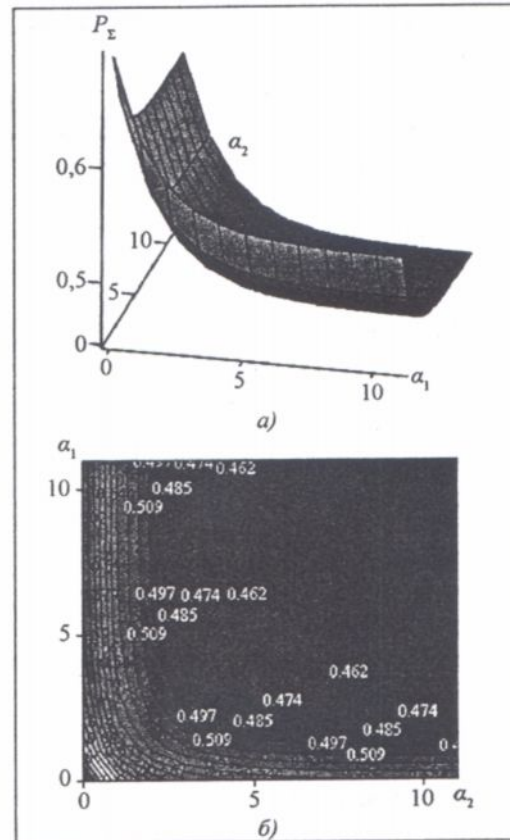


Рис. 3

$\phi_{m1} = \phi_{m2} = \phi_{m11} = \phi_{m21} = \phi_{m111} = \phi_{m211} = 0$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  меняются от 0 до 22,5 дБ с шагом 2,5 дБ. На вертикальной оси (рис. 3, а) нанесены относительные значения  $P_{\Sigma} = f(\alpha_1, \alpha_2)$ ; значения  $\alpha_1, \alpha_2$  на горизонтальных осях даны в относительных единицах, причем величинам 0, 5, 10 соответствуют значения 0, 10 и 22,5 дБ соответственно.

● Таким образом, АДОС на основе предложенного ТВФ позволяет сформировать унимодальную функцию цели, что важно для работы СПРП при использовании минимаксного критерия эффективности и подавлении широкополосной помехи.

### Литература

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Лексаченко. – М. Радио и связь, 1986.
2. Журавлёв А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.О. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
3. Венкаускас К.К. Компенсация помех в судовых радиотехнических системах. – Л.: Судостроение, 1989.
4. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988.
5. Антенны и устройства СВЧ / Под ред. Д.И. Воскресенского. – М. Радио и связь, 1981.

Поступила после доработки 20 февраля 2007 г.